

УДК 621.383.525

ПАССИВАЦИЯ ПОВЕРХНОСТИ ИК-ФОТОПРИЁМНИКОВ НА ОСНОВЕ ГЕТЕРОСТРУКТУР $\text{InSb}/\text{In}_{1-x}\text{Al}_x\text{Sb}$

© М. А. Суханов, М. С. Аксенов, А. К. Бакаров, И. Д. Лошкарев,
К. С. Журавлев

*Институт физики полупроводников им. А. В. Ржанова СО РАН,
630090, г. Новосибирск, просп. Академика Лаврентьева, 13
E-mail: msukhanov@isp.nsc.ru*

Исследованы способы пассивации мезоструктур фотоприёмников на основе nVn -гетероструктур $\text{InSb}/\text{In}_{1-x}\text{Al}_x\text{Sb}$, выращенных методом молекулярно-лучевой эпитаксии. Мезоструктуры сформированы методами фотолитографии и жидкостного травления. Для пассивации поверхности мезоструктур использовались два различных диэлектрика Al_2O_3 и Si_3N_4 . Показано, что диэлектрик Si_3N_4 эффективно пассивирует поверхность мезоструктур, и объёмный канал протекания тока является преобладающим, в мезоструктурах, пассивированных Al_2O_3 , доминирует поверхностный ток утечки. При малых обратных смещениях корреляция между величиной тока и площадью мезоструктуры нарушается, что обусловлено влиянием дефектов. Моделирование вольт-амперных характеристик мезоструктур при 77 К показывает, что основной вклад в темновой ток вносит туннельный ток электронов через барьер $\text{In}_{1-x}\text{Al}_x\text{Sb}$.

Ключевые слова: ИК-фотоприёмники, InSb , пассивация, темновой ток.

DOI: 10.15372/AUT20240208

EDN: EITXKA

Введение. Фотоприёмники инфракрасного (ИК) диапазона активно используются в различных областях науки и техники: биологии, медицине, астрономии, мониторинге окружающей среды. Одним из основных полупроводников для создания матричных ИК-фотоприёмных устройств (МФПУ) является InSb , имеющий ширину запрещённой зоны 0,23 эВ и высокую подвижность электронов $\sim 77000 \text{ см}^2/\text{Вс}$ при 77 К [1–3]. Главным фактором, уменьшающим чувствительность ИК-фотоприёмников, является величина темнового тока, имеющего объёмную и поверхностную компоненты. Объёмную компоненту преимущественно составляют диффузионный и генерационно-рекомбинационный темновые токи ($J_{\text{дифф}}$ и $J_{\text{ген.рек}}$), связанные соответственно с межзонной генерацией носителей заряда и генерацией носителей через энергетические уровни в запрещённой зоне. При приложении к фотоприёмнику высоких обратных смещений ($U_{\text{обр}}$) преобладающим становится туннельный ток [3]. Отдельные пиксели фотоприёмной матрицы формируются в виде мезоструктур. На поверхности мезоструктур образуются поверхностные состояния, по которым может протекать ток. Для его подавления поверхность мезоструктур пассивируют, проводя различные химические обработки и/или осаждая диэлектрики [4, 5]. Для понижения объёмной компоненты темнового тока фотоприёмные устройства охлаждают до криогенных температур, что, однако, увеличивает размер, вес и энергопотребление устройств — SWaP-параметры (size, weight and power) [6]. В последнее время для повышения рабочей температуры фотоприёмников вместо традиционных PIN-фотодиодов активно исследуют и используют nVn -гетероструктуры на основе различных материалов [7–9], в том числе на основе $\text{InSb}/\text{In}_{1-x}\text{Al}_x\text{Sb}$ [10, 11]. Фотоприёмные nVn -гетероструктуры состоят из контактного слоя n-InSb с электронной проводимостью, широкозонного барьера $\text{In}_{1-x}\text{Al}_x\text{Sb}$ (В) и поглощающего слоя n-InSb . Использование барьера позволяет уменьшить

объёмную компоненту темнового тока [12]. Кроме того, наличие разрыва в зоне проводимости на гетерогранице барьер — поглощающий слой теоретически даёт возможность подавить поверхностный ток утечки [13]. Таким образом, исследование и развитие фотоприёмных nVn-гетероструктур позволит уменьшить SWaP-параметры МФПУ. Насколько нам известно, данных о пассивации фотоприёмных устройств на основе nVn-гетероструктур в открытой научной литературе мало. Также отсутствуют результаты анализа туннельных механизмов протекания тока, которые должны вносить наибольший вклад в темновой ток при подавлении остальных компонент.

Цель данной работы — поиск способа пассивации мезаструктур на основе гетероструктур InSb/In_{1-x}Al_xSb, определение основного канала протекания тока, а также оценка вклада туннельного тока в темновой ток мезаструктур.

Методы и материалы. Гетероструктуры InSb/In_{1-x}Al_xSb были выращены методом молекулярно-лучевой эпитаксии в установке Riber Compact 21-T, оснащённой вентильным источником сурьмы, а также источниками кремния, индия и алюминия. Гетероструктуры выращивались на легированных теллуром подложках InSb с концентрацией электронов $\sim 5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$. Использовались 2 типа подложек InSb: сингулярные подложки InSb (001) и подложки InSb (001), отклонённые на 2° в сторону (111)A. Отклонённые подложки позволяют получить гладкую морфологию поверхности [14]. Калибровка потоков материалов производилась с помощью ионизационного вакуумметра, который помещался непосредственно перед подложкой перед началом роста. Процесс удаления оксида с поверхности подложки и рост гетероструктур контролировался *in-situ* с помощью дифракции быстрых электронов (ДБЭ) на отражение, угол падения пучка электронов на поверхность подложки составлял 3° , ускоряющее напряжение 12 кВ. Состав и скорость роста слоёв определялись по осцилляциям интенсивности зеркального рефлекса ДБЭ. Температура подложки в процессе роста контролировалась с помощью термпары. Контактный слой n-InSb толщиной 400 нм был легирован кремнием до концентрации электронов $n = 1,8 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$. Нелегированный барьерный слой In_{1-x}Al_xSb толщиной 50 нм выращивался варизонным, доля алюминия (x) варьировалась от 0,1 до 0,3 путём повышения температуры источника алюминия в процессе роста слоя In_{1-x}Al_xSb. Поглощающий слой n-InSb толщиной 2400 нм имел концентрацию электронов $n = 2 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ при температуре 77 К. Морфология поверхности гетероструктур изучалась методом атомно-силовой микроскопии (АСМ). Структурное качество и состав структуры оценивались методом рентгеновской дифракции по кривым качания (004) и (115). Для измерения темновых токов на основе выращенных гетероструктур были сформированы мезаструктуры методами фотолитографии и жидкостного травления. На мезаструктурах формировались два омических контакта круглой формы: к контактному слою n-InSb и к подложке (базовый контакт). Формирование контактов осуществлялось путём напыления Ti/Au толщиной 20/150 нм. Мезаструктуры формировались путём жидкостного травления гетероструктур до подложки вне области контактов, глубина травления контролировалась с помощью сканирующего электронного микроскопа. После формирования мезаструктур и напыления металлических контактов производилось осаждение одного из двух диэлектриков: Al₂O₃ или Si₃N₄. Диэлектрик Al₂O₃ толщиной 20 нм формировался методом атомно-слоевого осаждения (ALD), Si₃N₄ толщиной 50 нм — методом химического осаждения из газовой фазы. Для определения основного канала протекания темнового тока диаметр металлизации варьировался от 50 до 200 мкм. Вольт-амперные характеристики (ВАХ) мезаструктур измерялись в темноте при температуре 77 К.

Результаты и обсуждение. На рис. 1 показаны АСМ-изображения поверхности nVn-гетероструктур, выращенных на отклонённых (рис. 1, *a*) и неотклонённых подложках InSb (рис. 1, *b*). Как видно из рис. 1, *a*, при росте на отклонённых подложках на поверхности гетероструктур наблюдаются полосы различной глубины, неоднородно распределённые по поверхности образца, среднеквадратичная шероховатость составила 4,6 нм.

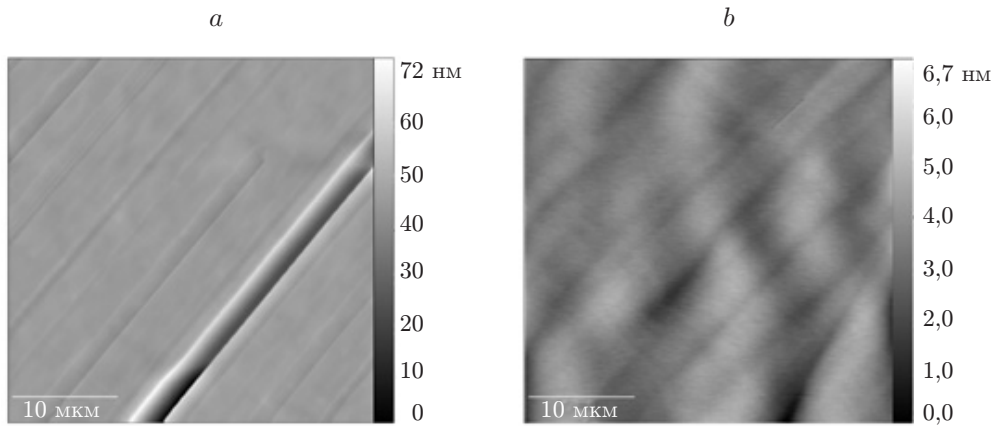


Рис. 1. АСМ-изображение поверхности pVn-гетероструктур, выращенных на: *a* — отклонённой, *b* — неотклонённой подложке InSb (001)

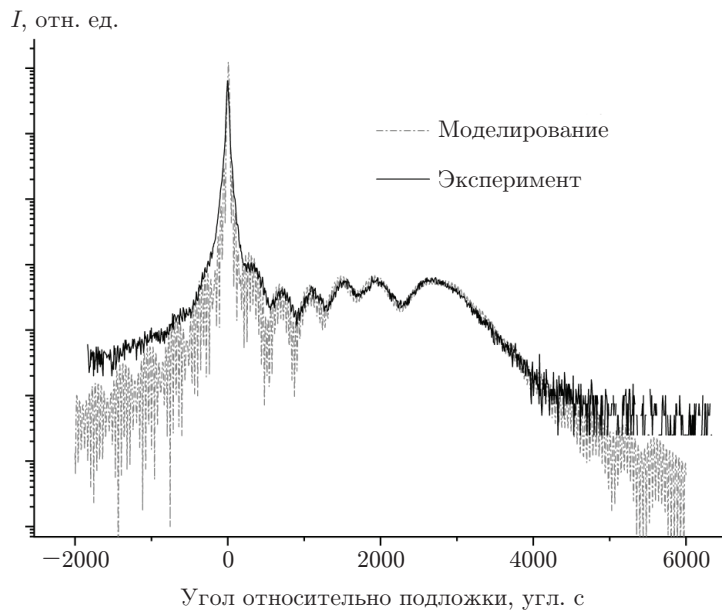


Рис. 2. Расчётные и экспериментальные кривые качания (004) для pVn-гетероструктуры с варизонным барьером $\text{In}_{1-x}\text{Al}_x\text{Sb}$

Морфология поверхности гетероструктур, выращенных на неотклонённых подложках, — гладкая; среднеквадратичная шероховатость составила 0,6 нм.

На рис. 2 показаны экспериментальные и расчётные кривые качания (004) pVn-гетероструктуры, выращенной на отклонённой подложке. При расчёте слой $\text{In}_{1-x}\text{Al}_x\text{Sb}$ задавался псевдоморфным, доля алюминия и толщина слоя являлись подгонными параметрами. Наилучшее согласование расчётной и экспериментальной кривых качания достигается при толщине $\text{In}_{1-x}\text{Al}_x\text{Sb}$ 49 нм и вариации доли Al от 0,09 до 0,29 (рис. 2). Заданные при росте параметры слоя $\text{In}_{1-x}\text{Al}_x\text{Sb}$ совпадают с расчётными параметрами.

Из-за наличия дефектов в виде глубоких полос на поверхности и большей шероховатости гетероструктур, выращенных на отклонённых подложках, мезаструктуры формировались на основе гетероструктур, выращенных на сингулярных подложках. Для определения поверхностной и объёмной компонент тока его зависимость от диаметра металлического

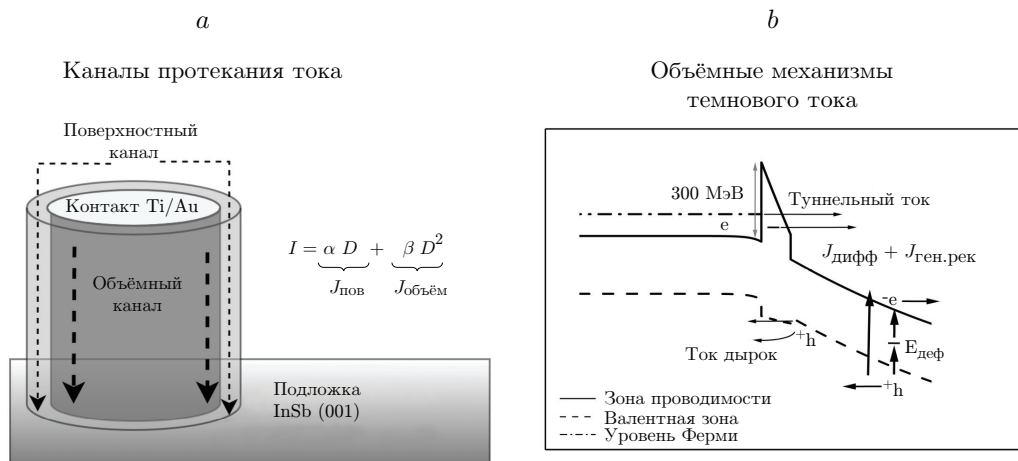


Рис. 3. Темновой ток в фотоприёмниках: *a* — каналы протекания тока в мезаструктуре, *b* — объёмные механизмы темнового тока в pVn-гетероструктурах

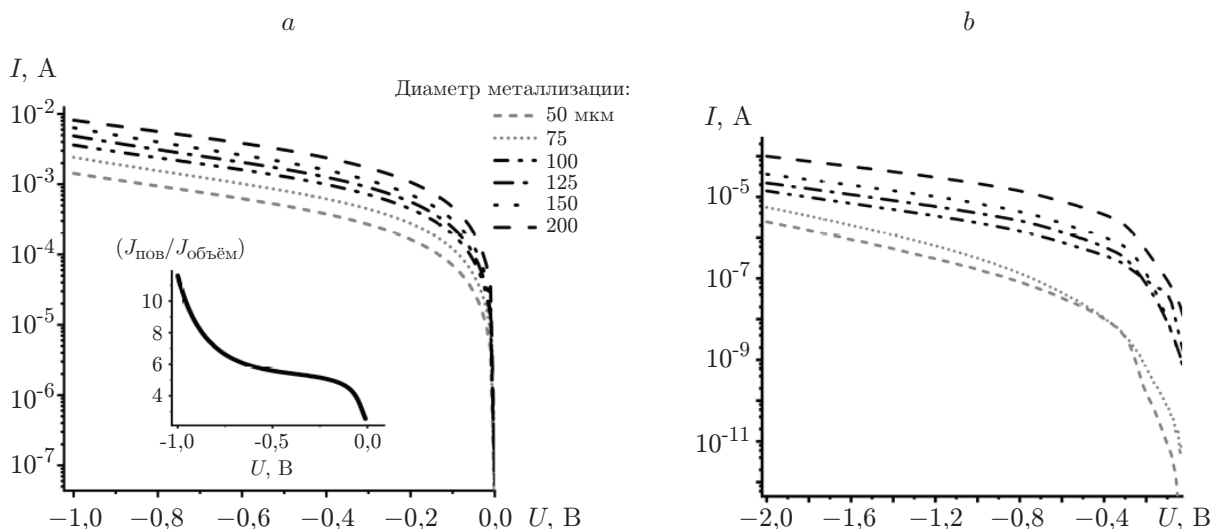


Рис. 4. ВАХ мезаструктур: *a* — с диэлектриком Al_2O_3 (на вставке показана зависимость отношения поверхностной и объёмной компонент тока от смещения); *b* — с диэлектриком Si_3N_4 , $T = 77 \text{ K}$

контакта (D) аппроксимировалась формулой:

$$J = \alpha D + \beta D^2, \tag{1}$$

где αD и βD^2 — поверхностная и объёмная компоненты темнового тока мезаструктуры соответственно (рис. 3, *a*). Коэффициенты α и β определяются из аппроксимации.

На рис. 4, *a* показаны ВАХ мезаструктур с диэлектриком Al_2O_3 и отношение поверхностной и объёмной компонент тока в зависимости от $U_{\text{обр}}$ при $T = 77 \text{ K}$. Из рис. 4, *a* видно, что величина тока растёт с площадью мезаструктуры во всём диапазоне $U_{\text{обр}}$. Анализ зависимости тока от диаметра с использованием формулы (1) показывает, что во всём диапазоне смещений преобладает поверхностная компонента тока (рис. 4, *a*, вставка). Это означает, что диэлектрик Al_2O_3 не позволяет эффективно пассивировать поверхность мезаструктур. Неэффективность Al_2O_3 , по-видимому, связана с образованием собственных оксидов InSb в процессе ALD, которые приводят к появлению приповерхностного слоя p -типа

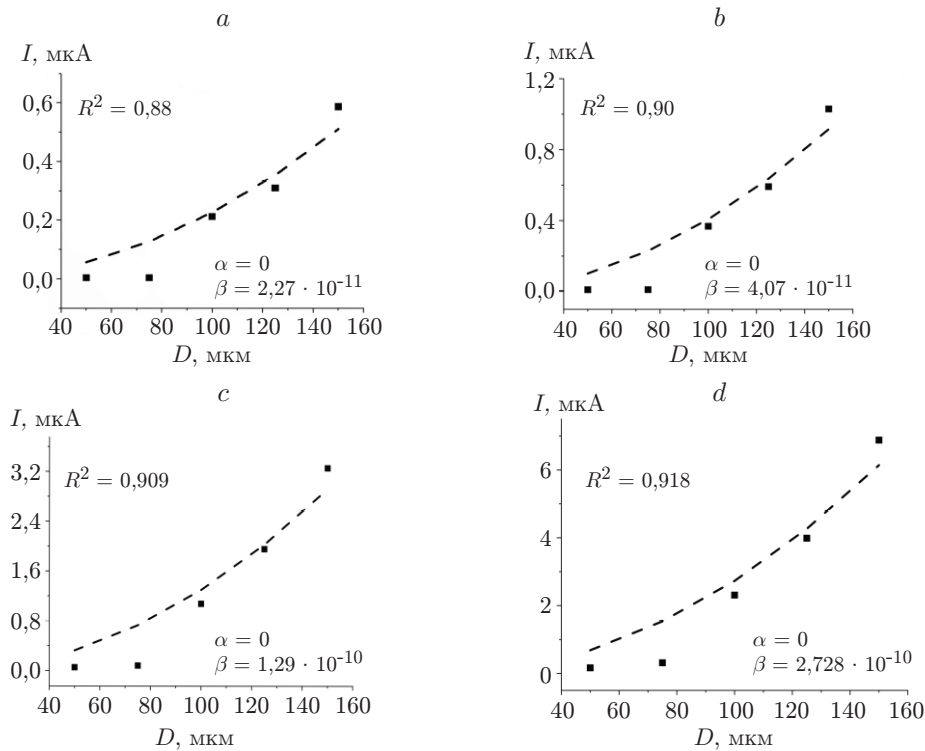


Рис. 5. Аппроксимация экспериментальной зависимости тока от диаметра мезаструктуры при различных $U_{\text{обp}}$: a — 0,3 В, b — 0,4 В, c — 0,7 В, d — 1 В. $T = 77 \text{ К}$. Квадратами обозначен эксперимент, пунктирной линией — аппроксимация в соответствии с формулой (1)

проводимости, являющегося каналом утечки [15]. Также стоит отметить, что наличие разрыва в зоне проводимости на гетерогранице $\text{InSb}/\text{In}_{1-x}\text{Al}_x\text{Sb}$, вопреки предположениям, не блокирует поверхностный ток.

На рис. 4, b показаны вольт-амперные характеристики мезаструктур с диэлектриком Si_3N_4 . Ток при применении Si_3N_4 на несколько порядков меньше, чем при использовании Al_2O_3 . Отметим, что для $U_{\text{обp}} < 0,2 \text{ В}$ корреляция между током и площадью мезаструктур отсутствует. Тем не менее аппроксимация данных формулой (1) при $U_{\text{обp}} > 0,2 \text{ В}$ показывает, что объёмная компонента тока является преобладающей (рис. 5). При отличии от нуля коэффициента α коэффициент детерминации уменьшается.

Для подробного изучения области малых смещений был проведён статистический анализ ВАХ мезаструктур, покрытых Si_3N_4 , с различной площадью мезаструктур. Наибольшая плотность тока наблюдается у мезаструктур диаметром 150 и 200 μm , наименьшая — для диаметров 50 и 75 μm . По мере увеличения $U_{\text{обp}}$ разброс плотностей тока уменьшается. Этот небольшой разброс может быть связан с туннелированием через уровни дефектов барьера $\text{In}_{1-x}\text{Al}_x\text{Sb}$ или протеканием тока по неактивированным поверхностным состояниям (см. рис. 3, b). Ввиду гладкой морфологии поверхности гетероструктуры и псевдоморфности слоя $\text{In}_{1-x}\text{Al}_x\text{Sb}$, наиболее вероятными типами дефектов, увеличивающих темновой ток, являются точечные, а не протяжённые дефекты. Увеличение площади мезаструктуры повышает вероятность попадания дефекта на контакт, поэтому мезаструктуры с наибольшей площадью будут иметь наибольшую плотность темнового тока. В таком случае в (1) коэффициент β будет отличаться у различных мезаструктур, что затрудняет анализ.

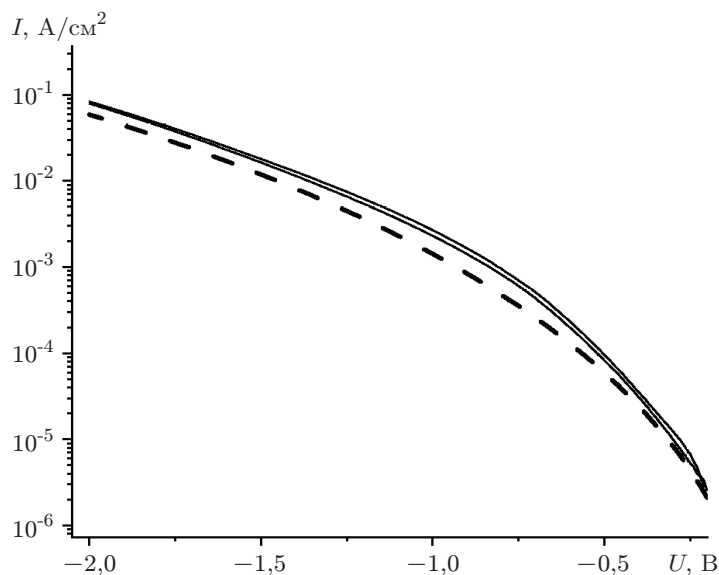


Рис. 6. Сравнение экспериментальных и расчётных ВАХ мезоструктур. Эксперимент показан сплошной кривой ($T = 77$ К), рассчитанный туннельный ток — штриховой

При $T = 77$ К генерационно-рекомбинационная и диффузионная компоненты темнового тока подавлены, преобладающим механизмом которого, скорее всего, является туннельный ток электронов со стороны контактного слоя через барьер $\text{In}_{1-x}\text{Al}_x\text{Sb}$. При повышении $U_{\text{обр}}$ барьер гетероструктуры становится туннельно-прозрачным, при этом из-за варизонности слоя $\text{In}_{1-x}\text{Al}_x\text{Sb}$ увеличивается эффективное электрическое поле в барьере. Для проверки этой гипотезы был проведён расчёт туннельного тока. Для этого были смоделированы зонные диаграммы nВn-гетероструктур при различных смещениях в программном пакете *nextnano*, на основе зонных диаграмм был рассчитан туннельный ток по модели TSU-ESAKI [16]. Параметры полупроводников InSb и AlSb , применяемые при моделировании туннельного тока и зонных диаграмм, взяты из [17]. Коэффициент туннелирования для электронов при треугольном потенциальном барьере вычислялся согласно модели из работы [18], для трапециевидного барьера использовался коэффициент туннелирования в соответствии с квазиклассическим приближением [16]. Электрическое поле в барьере $\text{In}_{1-x}\text{Al}_x\text{Sb}$ рассчитывалось из градиента потенциала, эффективная масса электрона в барьере принималась равной средней между составами $\text{In}_{0,9}\text{Al}_{0,1}\text{Sb}$ и $\text{In}_{0,7}\text{Al}_{0,3}\text{Sb}$. На рис. 6 показано сравнение экспериментальной и расчётной ВАХ мезоструктуры.

Для анализа и сравнения были выбраны две мезоструктуры с наименьшими плотностями темнового тока. Как видно из рис. 6, порядок величины рассчитанного туннельного тока совпадает с экспериментальными значениями тока. Плотность тока в остальных мезоструктурах на порядок выше расчётной плотности тока, что, скорее всего, связано с вкладом дефектов в туннельный ток, который не учитывается в модели. Таким образом, преобладающим механизмом темнового тока в бездефектных $\text{InSb}/\text{In}_{1-x}\text{Al}_x\text{Sb}$ nВn-гетероструктурах является туннельный ток. Уменьшение туннельного тока в nВn-гетероструктурах возможно за счёт увеличения толщины или доли Al в барьерном слое, а также за счёт уменьшения степени легирования контактного слоя. Ввиду рассогласования параметра решётки слоёв InSb и $\text{In}_{1-x}\text{Al}_x\text{Sb}$, оптимальным является второй вариант.

Заключение. В рамках представленной работы показано, что диэлектрик Si_3N_4 позволяет подавить поверхностный ток утечки фотоприёмных мезаструктур на основе $\text{InSb}/\text{In}_{1-x}\text{Al}_x\text{Sb}$, объёмная компонента темнового тока является преобладающей. При использовании диэлектрика Al_2O_3 преобладающим оказывается поверхностный ток утечки. При малых смещениях корреляция темнового тока и площади мезаструктуры нарушается из-за влияния дефектов. Согласно сравнительному анализу рассчитанных и экспериментальных ВАХ мезаструктур, темновой ток бездефектных мезаструктур определяется туннельным током электронов через барьер гетероструктуры. Оптимальным вариантом дальнейшего подавления туннельного тока является уменьшение степени легирования контактного слоя.

Финансирование. Работа поддержана грантом Министерства науки и высшего образования РФ № 075-15-2020-797 (13.1902.21.0024).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Abautret J., Perez J. P., Evirgen A. et al.** Characterization of midwave infrared InSb avalanche photodiode // *Journ. Appl. Phys.* 2015. **117**. 244502. DOI: 10.1063/1.4922977.
2. **Sun W., Fan H., Peng Z. et al.** Photodiode properties of molecular beam epitaxial InSb on a heavily doped substrate // *Infrar. Phys. Technol.* 2014. **62**. P. 143–146.
3. **Abautret J., Perez J. P., Evirgen A. et al.** Electrical modeling of InSb PiN photodiode for avalanche operation // *Journ. Appl. Phys.* 2013. **113**. 183716. DOI: 10.1063/1.4804956.
4. **Park S., Choi D., Park H. et al.** Suppression of surface leakage current in InSb photodiode by ZnS passivation // *Int. Journ. Nanotechnology.* 2016. **13**, N 4–6. P. 392–401.
5. **Simchi H., Sareminia Gh., Shafiekhani A. et al.** Passivation of InSb surface for manufacturing infrared devices // *Infrar. Phys. Technol.* 2008. **51**, Iss. 3. P. 263–269.
6. **Rogalski A.** Scaling infrared detectors—status and outlook // *Repts Progr. Phys.* 2022. **85**, N 12. 126501. DOI: 10.1088/1361-6633/ac97a8.
7. **Soibel A., Hill C. J., Keo S. A. et al.** Room temperature performance of mid-wavelength infrared InAsSb nBn detectors // *Appl. Phys. Lett.* 2014. **105**. 023512. DOI: 10.1063/1.4890465.
8. **Cowan V. M., Morath C. P., Swift S. M. et al.** Electrical and optical characterization of InAs/GaSb-based nBn IR detector // *Proc. SPIE.* 2010. **7780**. 778006.
9. **Itsuno A. M., Phillips J. D., Velicu S.** Mid-wave infrared HgCdTe nBn photodetector // *Appl. Phys. Lett.* 2012. **100**. 161102. DOI: 10.1063/1.4704359.
10. **Evirgen A., Abautret J., Perez J. P. et al.** Midwave infrared InSb nBn photodetector // *Electron. Lett.* 2014. **50**, Iss. 20. P. 1472–1473.
11. **Суханов М. А., Бакаров А. К., Протасов Д. Ю. и др.** AlInSb/InSb-гетероструктуры для ИК-фотоприёмников, выращенные методом молекулярно-лучевой эпитаксии // *Письма в ЖТФ.* 2020. **46**, вып. 4. С. 3–6.
12. **Maimon S., Wicks G. W.** nBn detector, an infrared detector with reduced dark current and higher operating temperature // *Appl. Phys. Lett.* 2006. **89**. 151109. DOI: 10.1063/1.2360235.
13. **Sidor D. E., Savich G. R., Wicks G. W.** Surface leakage mechanisms in III-V infrared barrier detectors // *Journ. Electron. Mater.* 2016. **45**, N 9. P. 4663–4667.
14. **Johnson A. D., Smout A. B. J., Cairns J. W. et al.** Non-Equilibrium InSb/InAlSb Diodes Grown by MBE // *MRS Online Proc. Library (OPL).* 1997. **484**. P. 143–152.
15. **Sidor D. E., Savich G. R., Wicks G. W.** Surface conduction in InAs and GaSb // *Proc. SPIE.* 2015. **9616**. 96160U.

16. **Gehring A., Selberherr S.** Modeling of tunneling current and gate dielectric reliability for nonvolatile memory devices // IEEE Trans. Device and Materials Reliability. 2004. **4**, Iss. 3. P. 306–319. DOI: 10.1109/TDMR.2004.836727.
17. **Vurgaftman I., Meyer J. R., Ram-Mohan L. R.** Band parameters for III-V compound semiconductors and their alloys // Journ. Appl. Phys. 2001. **89**, N 11. P. 5815–5875.
18. **Forbes R. G., Deane J. H. B.** Transmission coefficients for the exact triangular barrier: An exact general analytical theory that can replace Fowler & Nordheim's 1928 theory // Proceedings of the Royal Soc. A: Math. Phys. Eng. Sci. 2011. **467**. P. 2927–2947.

Поступила в редакцию 13.12.2023

После доработки 22.12.2023

Принята к публикации 26.12.2023
